

# Ein Programm zur Erforschung aktueller Probleme in Grundwasserwirtschaft und Grundwasserschutz

## A Research Program for the Investigation of Recent Problems in Groundwater Resources Management and Protection

### Kurzfassung / Abstract

Die Grundwasserforschungsaktivitäten am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart werden dargestellt. Im Rahmen des Forschungsschwerpunkts Grundwasserschutz werden am Computer, im Labor und an Naturmeßfeldern numerische Transportmodelle, Meßverfahren und Erkundungstechniken entwickelt und zur Lösung aktueller Aufgaben der Grundwasserwirtschaft und des Grundwasserschutzes eingesetzt.

*The groundwater research activities of the Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart are described. In the framework of the research focus on groundwater protection, numerical transport models as well as measurement and exploration techniques are developed at the computer, in the laboratory and on field test sites. These methods are applied to the solution of actual problems of groundwater management and groundwater protection.*

### 1 Einführung

Grundwasser ist unsere wichtigste Trinkwasserressource und ein kostbares Umweltgut. Im Wasserhaushaltsgesetz ist das Ziel verankert, den natürlichen Wasserschatz als eine wesentliche Lebensgrundlage zu sichern und zu schützen. Hier kommt der Wissenschaft die Aufgabe zu, die für einen wirkungsvollen und vorausschauenden Umweltschutz notwendigen fachlichen Grundlagen und Methoden zu erarbeiten, wobei die Komplexität der Probleme immer zwingender die interdisziplinäre Zusammenarbeit erfordert.

Der vorliegende Beitrag stellt das Programm zur Grundwasserforschung dar, das im Rahmen eines Forschungsschwerpunktes der Universität Stuttgart am Institut für Wasserbau verfolgt wird. Die Forschung in diesem Bereich ist im letzten Jahrzehnt aus einem ständigen Wechselspiel zwischen umweltorientierter Grundlagenforschung und der Beschäftigung mit praktischen Problemen gewachsen. Die Bemühungen um ein Forschungsprogramm wurden von mehreren Forschungsförderorganisationen unterstützt und durch Kooperation mit zahlreichen Partnern in Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft mitgeprägt.

Die Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten im Bereich Grundwasser lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Grundwasserbewirtschaftung und Wasserversorgung,
- Landwirtschaft und Grundwasserbeschaffenheit,
- Untergrundkontamination und Sanierung,
- Wärmehaushalt des Untergrunds und seine Nutzung.

Erklärtes Ziel der Forschungsarbeiten ist es, sowohl einen Beitrag zur Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen zu liefern, als auch die Umsetzung neuer Forschungserkenntnisse in die wasserwirtschaftliche Praxis zu unterstützen.

### 2 Wissenschaftliche Zielsetzung

Großräumige anthropogene Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität sind in allen Industrieländern festzustellen. Im Hinblick auf die Nutzung des Grundwassers für die Trinkwasserversorgung haben insbesondere Veränderungen der Grundwassertemperaturen, Verschmutzungen durch chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) sowie die Belastung durch Nitrate Pro-

bleme bereitet. Weitere Stoffgruppen kommen aufgrund der aktuellen Probleme mit kontaminierten Standorten und Altlasten hinzu. Hierbei sieht sich die Wasserwirtschaft zunehmend mit Fragestellungen konfrontiert, die eine quantitative Beschreibung und Vorausberechnung der Ausbreitungsvorgänge im Grundwasser voraussetzen.

Aufbauend auf den strömungsmechanischen, hydrologischen, physikalischen und chemischen Grundlagen des Stofftransports werden Modell- und Meßkonzepte entwickelt, die sich direkt an den Fragestellungen der praktischen Anwendungen orientieren. Das Forschungsprogramm umfaßt folgende Elemente:

- Erarbeitung von Berechnungsgrundlagen für Strömung und Transport,
- Entwicklung neuer Meßverfahren und Erkundungsmethoden,
- Erprobung an Laborexperimenten und Fallstudien,
- Einsatz für Erkundungs-, Bewirtschaftungs- und Sanierungskonzepte.

Zum Thema „Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser“ wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft eine interdisziplinäre Forschergruppe an unserem Institut angesiedelt, an der das Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Universität Hohenheim und das Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe beteiligt sind [1]. Die Forschergruppe wird seit 1984 als ein Element des DFG-Schwerpunktprogramms „Schadstoffe im Grundwasser“ gefördert (Bild 1), wobei sich die Forschergruppe auf die exemplarischen Stoffgruppen Wärme, chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) und Nitrat konzentriert.

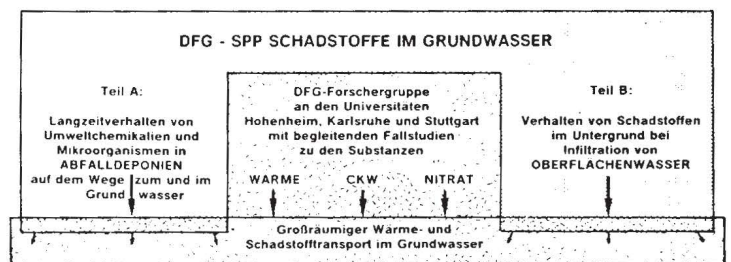


Bild 1: DFG-Schwerpunktprogramm Schadstoffe im Grundwasser

Veranlassung zur Einrichtung der Forschergruppe gab die Erkenntnis, daß – im Gegensatz zu numerischen Grundwasserströmungsmodellen – Transportmodelle bisher noch kein Werkzeug sind, das routinemäßig eingesetzt werden kann. In der Regel besteht eine große Diskrepanz zwischen den Erfordernissen an die Eingabedaten und dem im allgemeinen sehr begrenzten Naturdatenmaterial. Das betrifft das Strömungsfeld, die anfänglichen Konzentrationsverteilungen, den Schadstoffeintrag sowie die Adsorptions- und Reaktionsparameter. Noch weitgehend ungeklärt ist die Interpretation von Meßdaten und die Bedeutung der Bohrlochhydraulik und Probenahmetechnik. Das Problem der Modelleichung und Verifizierung ist damit gegenüber der reinen Strömungsmodellierung erheblich erschwert. Zur Quantifizierung der Unsicherheit der Prognosen von Transportmodellen zufolge datenbedingter Unsicherheiten liegen noch keine Aussagen vor.

Die wissenschaftliche Zielsetzung der Forschungsarbeiten ist deshalb folgenden Fragen gewidmet:

- Verbesserung der Modellansätze für die durch geologische Inhomogenitäten bedingte Makrodispersion;
- Entwicklung von Transportmodellen mit erweiterten Adsorptions- und Reaktionstermen zur Berücksichtigung von Ungleichgewichtszuständen und mehreren miteinander reagierenden Wasserinhaltsstoffen;
- Entwicklung von Stickstoffhaushaltsmodellen für die ungesättigte Zone;
- Identifizierung der wesentlichen Einflußgrößen der natürlichen Denitrifikation;
- Analyse der datenbedingten Unsicherheit von Modellaussagen und deren stochastische Interpretation als Voraussetzung für die korrekte Anwendung von Modellen;
- Verbesserung der Meß- und Probenahmetechnik.

Eine neue, große Aufgabe stellt sich mit der Einrichtung eines „Testfeldes Wasser und Boden“, das auf der Horkheimer Insel im Rahmen des Projekts Wasser-Abfall-Boden (PWAB) des Landes Baden-Württemberg mit Unterstützung durch die Stadtwerke Heilbronn eingerichtet wird. In dem ca. 2 ha großen Naturmeßfeld wird unter der Federführung des Instituts für Wasserbau ein interdisziplinäres Untersuchungsprogramm unter Beteiligung des Instituts für Bodenkunde und Standortslehre sowie des Instituts für Pflanzenbau der Universität Hohenheim, des Instituts für Informatik der Universität Stuttgart und des Instituts für Radiochemie am Kernforschungszentrum Karlsruhe durchgeführt. Die Forschungsthemen sind:

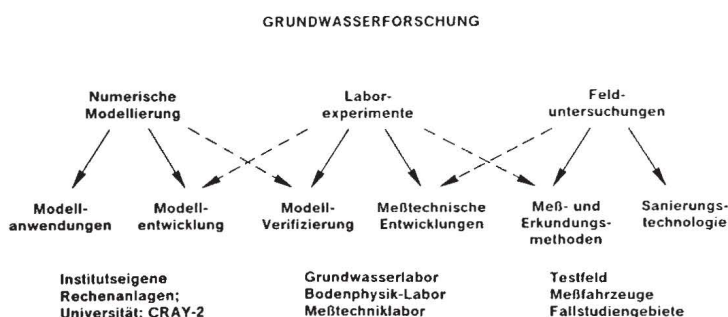
- Entwicklung von Meß-, Erkundungs- und Überwachungsmethoden für den Boden- und Grundwasserschutz;
- Kurz- und langfristige Veränderungen der Boden- und Grundwasserqualität durch landwirtschaftliche Aktivitäten, insbesondere durch den Einsatz von Agrarchemikalien;
- Entwurf eines verteilten Datenhaltungssystems für die Speicherung, Verwaltung, Sicherung und flexible Bereitstellung von Ergebnissen langfristig angelegter Meßreihen;
- Das Zustandekommen der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit in Abhängigkeit von den in der ungesättigten Zone stattfindenden chemischen Prozessen.

Die praktische Bedeutung des Forschungsprogramms liegt angesichts der zahlreichen Problemfälle im In- und Ausland auf der Hand. Es werden einsatzfähige Methoden und Modelle benötigt, die eine integrierende und koordinierte Betrachtung der strömungsmechanischen, hydrogeologischen, physikalischen, chemischen und bodenkundlichen Aspekte ermöglichen.

### 3 Arbeitsmethoden

Das Forschungsprogramm ist auf den Einsatz aller prinzipiellen Arbeitsmethoden in gegenseitiger Ergänzung ausgerichtet, wie dies schematisch in *Bild 2* dargestellt ist.

Die Entwicklung von Transportmodellen umfaßt schwerpunktmäßig theoretische und numerische Arbeiten sowie systematische experimentelle Laboruntersuchungen. Die Modellentwicklungen gehen von bekannten strömungsmechanischen, physikalischen und chemischen Grundlagen aus und werden durch gezielte Laborversuche ergänzt und verifiziert.



*Bild 2: Arbeitsmethoden und Einrichtungen*

Komplementär hierzu wird die Entwicklung und Erprobung neuer Meßverfahren vorangetrieben.

Die Grundlagenforschung wird von mehreren Fallstudien mit intensiven Meßprogrammen begleitet, an denen die entwickelten numerischen Modelle laufend erprobt werden hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit, Datenkompatibilität und Prognosefähigkeit in der praktischen Anwendung. Hierzu werden drei exemplarische Stoffgruppen unterschiedlicher Komplexität untersucht:

- Wärme: Kaltwasserversickerungsversuche in Aefligen und Kirchberg, Schweiz. Transport und Ausbreitung von Wärme aus Warm- und Kaltwasserversickerungen als ein punktförmiger Eintrag mit meist bekannter Quellstärke und bekannten Stoffeigenschaften im Hinblick auf den Transport;
- CKW: Fallstudie Mannheim–Heidelberg, mehrere CKW-Kontaminationsfälle. Transport und Ausbreitung von chlorierten Kohlenwasserstoffen aus kontaminierten Standorten als ein punktförmiger Eintrag mit meist unbekannter Quellstärke, aber vergleichsweise „einfachen“ Stoffeigenschaften im Hinblick auf den Transport;
- Nitrat: Fallstudien Bruchsal-Karlsdorf und Lobdengau. Transport und Ausbreitung von Nitrat aus landwirtschaftlicher Nutzung als ein großflächiger Eintrag durch die ungesättigte Zone mit komplexen Reaktions- und Transporteigenschaften.

Darüber hinaus wird durch die Einrichtung des Testfeldes „Wasser und Boden“ auf der Horkheimer Insel die Möglichkeit eröffnet, gezielte und detaillierte Naturuntersuchungen unter kontrollierten Randbedingungen durchzuführen und geeignete Meß- und Erkundungsstrategien zu testen.

### 4 Entwicklung numerischer Strömungs- und Transportmodelle

Ein Ziel der Forschungsarbeiten ist es, Beurteilungskriterien für die Einsatzfähigkeit von Transportmodellen zur Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen zu liefern. Es sollen Aussagen gewonnen werden darüber,

- welche Modellmethoden für welche Fragen im Grundwasserschutz sinnvoll eingesetzt werden können,
- welche Meßdaten in welcher Dichte und Qualität für die einzelnen Stufen der Modellhierarchie (vom einfachen zum komplexen Modell) erforderlich sind,
- welche Meßverfahren mit welcher Aussagekraft zur Verfügung stehen,
- welche Erwartungen an die Aussagefähigkeit und Genauigkeit der Rechenergebnisse gestellt werden können,
- in welchem Verhältnis Meß- und Modellieraufwand zur Zuverlässigkeit der Ergebnisse stehen,
- und schließlich auch in welchen Fragen Modellrechnungen nicht weiterhelfen.

Der Einsatz der Modelle als Entscheidungshilfen für die Planung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen wird für die untersuchten Bereiche Wärme, CKW und Nitrat jeweils illustriert. Die Modellkonzeption sieht vor, daß das Instrumentarium der Grundwassertransportmodelle so aufbereitet wird, daß eine Übertragung und Anwendung in analoger Weise auch für andere Stoffgruppen über die spezifischen Stoffgruppen der Fallstudien hinaus ermöglicht wird.

Für die numerischen Arbeiten stehen mehrere institutseigene Rechenanlagen sowie die Einrichtungen des Rechenzentrums der Universität mit dem Cray-2 Großrechner zur Verfügung, auf den sowohl direkt als auch im Netzwerk über Workstations zugegriffen werden kann.

Die numerischen Entwicklungen werden in mehreren Teilprojekten mit jeweils eigener wissenschaftlicher Zielsetzung vorangetrieben. Im Teilprojekt „Hydrodynamische Dispersion in Grundwasserleitern“ werden Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, die zu verbesserten Ansätzen für die dispersive Vermischung in natürlichen Grundwasserleitern führen sollen, wenn diese geologische Schichtungen und Inhomogenitäten

aufweisen [10]. Geeignete mehrparametrische Ansätze zur Beschreibung der Dispersion werden in numerische Transportmodelle eingesetzt, anhand von Experimenten verifiziert und dann zur erweiterten numerischen Untersuchung von Schichtenstruktur- und Inhomogenitätseffekten verwendet. Es wird angestrebt, für den praktischen Einsatz von Grundwassermodellen eine wirklichkeitsnahe Berücksichtigung des makrodispersiven Transports zu ermöglichen.

Gegenstand des Forschungsvorhabens „Numerische Modellierung des Wärmetransports und Wärmehaushalts in Grundwasserleitern“ ist die Entwicklung und Verifizierung horizontaler Mehrschichtenmodelle zur Prognose des Ausbreitungsverhaltens großräumiger Temperaturanomalien [6]. Es wurde untersucht, inwieweit Mehrschichtenansätze eine adäquate Erfassung der vertikalen Wärmeströme und damit der räumzeitlichen Entwicklung von Temperaturfeldern erlauben, wobei auch der Frage der Datenerhebung in der Natur und ihrer Interpretation im Modell große Bedeutung zukommt.

Das Forschungsprojekt „Numerische Modellierung des großräumigen Transports von Schadstoffen im Grundwasser unter Berücksichtigung von Adsorption und chemischen Reaktionen“ hat die Entwicklung eines numerischen Schadstofftransportmodells für unterschiedliche Stoffe zum Gegenstand [5]. Das Modell beschränkt sich auf die horizontal- oder vertikale Betrachtung der gesättigten Zone. Es ist modular aufgebaut und enthält schrittweise die Optionen

- Adsorption im Gleichgewicht,
- Adsorption im Ungleichgewicht,
- mehrere chemisch wechselwirkende Wasserinhaltsstoffe.

Anhand der Fallbeispiele wird untersucht, in welcher Näherung die Modellierung des Transports von Wasserinhaltsstoffen im Feld möglich ist. Voraussetzung für eine Modellidentifikation ist die Kenntnis des Schadstoffeintrags sowie des Reaktionsverhaltens. Für die Modellierung des Nitrattransports werden diese Fragen in parallelen Forschungsvorhaben vom Institut für Bodenkunde und Standortslehre an der Universität Hohenheim und vom Engler-Bunte-Institut an der Universität Karlsruhe untersucht, wobei die Ergebnisse aller Beteiligten in das Modell eingebracht werden.

Die hier entwickelten anwendungsorientierten Strömungs- und Transportmodelle finden Einsatz als Entscheidungshilfen für:

- Planung von Grundwasser-Bewirtschaftungsmaßnahmen;
- Prognose der Auswirkungen von Grundwasserkontaminationen;
- Planung und Bemessung von Abwehr- und Sanierungsmaßnahmen.

## 5 Entwicklung neuer Meßmethoden und Experimente in Labor und Natur

Für die Forschungsarbeiten steht die gesamte Infrastruktur des Instituts für Wasserbau einschließlich Versuchsanstalt mit Modellhalle, Freigelände und Werkstätten sowie Meßtechnik- und Elektroniklabor zur Verfügung. Das Grundwasserlabor des Instituts umfaßt neben einem bodenphysikalischen Labor zur Bestimmung der Untergrundeigenschaften an ungestörten und gestörten Proben eine Vielzahl von Versuchsständen, die je nach Fragestellung mit unterschiedlichen Materialien gefüllt und unter definierten hydraulischen Bedingungen betrieben werden können. Die Experimente dienen folgenden Zielen:

- Anschauungsunterricht zum Verständnis physikalischer Vorgänge im Untergrund;
- Entwicklung, Erprobung und Überprüfung neuer Meßverfahren und Erkundungstechniken;
- Systematische Untersuchung der Strömungsprozesse und des Wanderungsverhaltens verschiedener Substanzen im Untergrund
- Erprobung von in-situ Sanierungsverfahren unter kontrollierbaren Randbedingungen.

Zur Verbesserung der Erkundungstechnik steht unter anderem ein Großversuchsstand mit 55 m<sup>3</sup> Aquifervolumen zur Verfü-

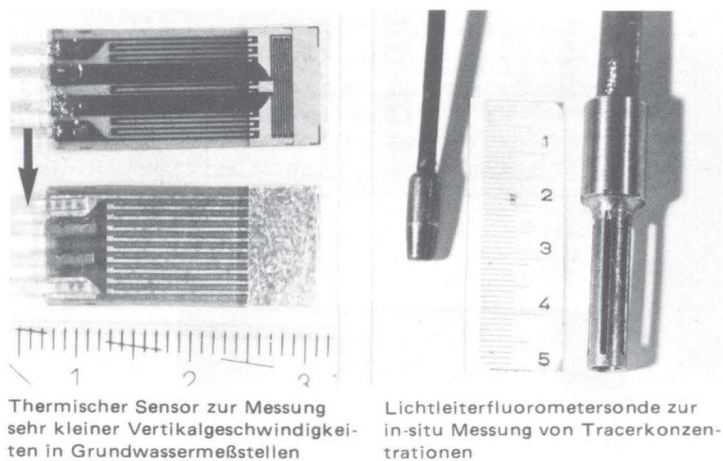


Bild 3: Neue Grundwasser-Meßsonden [1]

gung, in den eine originalgetreue 4-Zoll-Grundwassermeßstelle eingebaut ist. Dieser Versuchsstand wurde erstellt für das Vorhaben „Untersuchungen zur Bohrlochhydraulik: Die Bedeutung von Meßstellenausbau, Bohrlochmeßverfahren und Probenahmetechnik für die Gewinnung und Interpretation von Grundwassermeßdaten“. Hier sollen verbesserte Methoden zur Bestimmung von Stofffrachten im Grundwasser erarbeitet werden. Mit dem Ziel, praktische Hinweise für die Beprobung von Grundwassermeßstellen zu erarbeiten, wird deshalb unter kontrollierbaren Randbedingungen der Einfluß der Probenahme (z.B. Pumprate, Pumpdauer, Art der Beprobung) und des Meßstellenaufbaus auf die entnommenen Proben experimentell untersucht und ein neues Mehrfach-Probenahmesystem entwickelt. Für die Ermittlung des Tiefenprofils der Durchlässigkeit werden meßtechnische Neuentwicklungen zur Einbohrloch-Verdünnungsmessung (in-situ Lichtleiter-Fluorometer, Bild 3) und zum Einschwingverfahren betrieben. Darüber hinaus wird ein Flowmeter zur genaueren Messung sehr kleiner Vertikalströmungen in Grundwassermeßstellen entwickelt (Bild 3). Insgesamt sollen damit die geohydraulischen Gegebenheiten der Meßstelle besser erfaßt werden. Ein dreidimensionales Transportmodell wird anhand der Meßdaten verifiziert und dann für Sensitivitätsanalysen und die Interpretation von Naturmeßdaten eingesetzt.

Anhand ergänzender Naturmessungen wird die Anwendbarkeit der entwickelten Methoden und Verfahren unter verschiedenartigen Einsatzbedingungen im Feld erprobt. Hierfür stehen zwei Meßfahrzeuge zur Verfügung, die besonders ausgestattet sind zur Durchführung von bohrlochphysikalischen Messungen, Pumpversuchen und Grundwasserbeprobungen (Bild 4).

Im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen zur Dispersion werden an einem 14 m langen Versuchsstand systematische Experimente an einem künstlich aufgebauten Modellaquifer



Bild 4: Feldmessungen im Testgebiet Horkheimer Insel

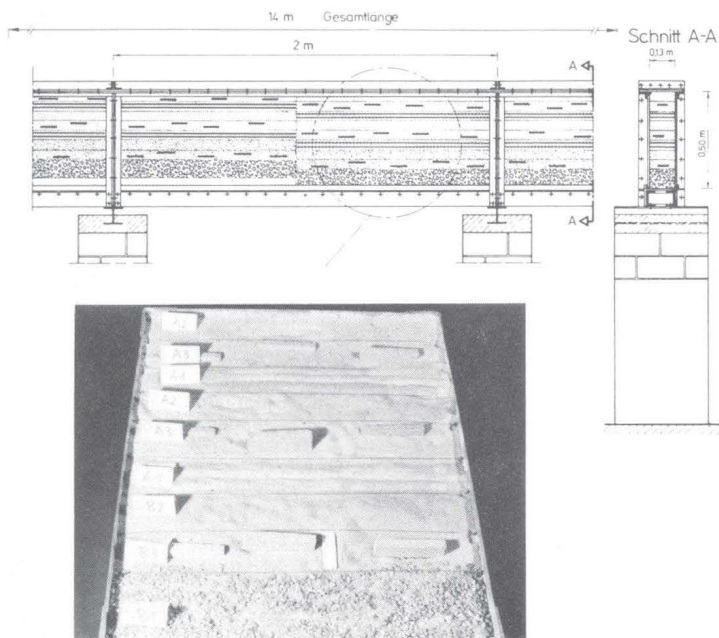


Bild 5: Dispersionsexperimente an einem Modellaquifer mit Inhomogenitäten [1]

durchgeführt, der aus insgesamt 81 Elementen unterschiedlicher, aber jeweils wohldefinierter Struktur mit Inhomogenitäten aufgebaut ist (Bild 5). Die Experimente verhelfen zu einem besseren Verständnis der Dispersion in einem natürlichen Grundwasserleiter, wenn dieser geologische Schichtungen oder Inhomogenitäten aufweist. Die Längsdispersion in geologischen Schichtenstrukturen wird hierbei als kombinierte Wirkung von differentieller Konvektion und Querdispersion betrachtet. Die systematischen Versuche dienen zur Bestimmung der Quer- und Längsdispersion im Modell und zur Überprüfung der verschiedenen mehrparametrischen Dispersionsansätze [1].

In einem Versuchsstand von 12 m Länge soll in Zusammenarbeit mit dem Hygiene-Institut der Universität Tübingen das Transport- und Abbauverhalten von Bakterien und Viren bei der Untergrundpassage systematisch untersucht werden.

Für die Simulation hydraulischer Sanierungsverfahren unter verschiedenartigen Randbedingungen steht ebenfalls eine Versuchsanlage zur Verfügung (s. Bild 8). Darüber hinaus ist eine Vielzahl von Säulen- und kleineren Anschauungsmodellen vorhanden.

Neben den Experimenten im Labor ist das Institut an mehreren Naturuntersuchungen und Fallstudien beteiligt (siehe Abschnitte 6 bis 8) und betreibt das Testfeld Wasser und Boden auf der Horkheimer Insel. Das Naturmeßfeld von circa 2 ha Ausdehnung erhält mit zunächst 30 Multilevel-Grundwasserbeobachtungspegeln, 2 Großlysimetern sowie zahlreichen Tensimetern und Saugplatten eine umfangreiche technische Ausstattung, die es gestattet, die methodischen Aspekte der Grundwassererkundung unter kontrollierten, natürlichen Bedingungen zu untersuchen. Eingesetzt werden geophysikalische Methoden (Goelektrik, Seismik, Bohrlochgeophysik), hydraulische Verfahren (Pump- und Injektionstests) und Tracerversuche sowie eine Reihe unterschiedlicher Probenahmesysteme.

## 6 Wärmetransport und Wärmehaushalt in Grundwasserleitern

Grundwasser eignet sich wegen seiner im jahreszeitlichen Verlauf nahezu konstanten Temperatur zur Nutzung als industrielles Kühlwasser, zum Betrieb von Wärmepumpen für Heizzwecke sowie zur saisonalen Speicherung von Solarenergie. Als Hilfsmittel für die Entwicklung von Bewirtschaftungskonzepten zur gezielten thermischen Nutzung des Grundwassers

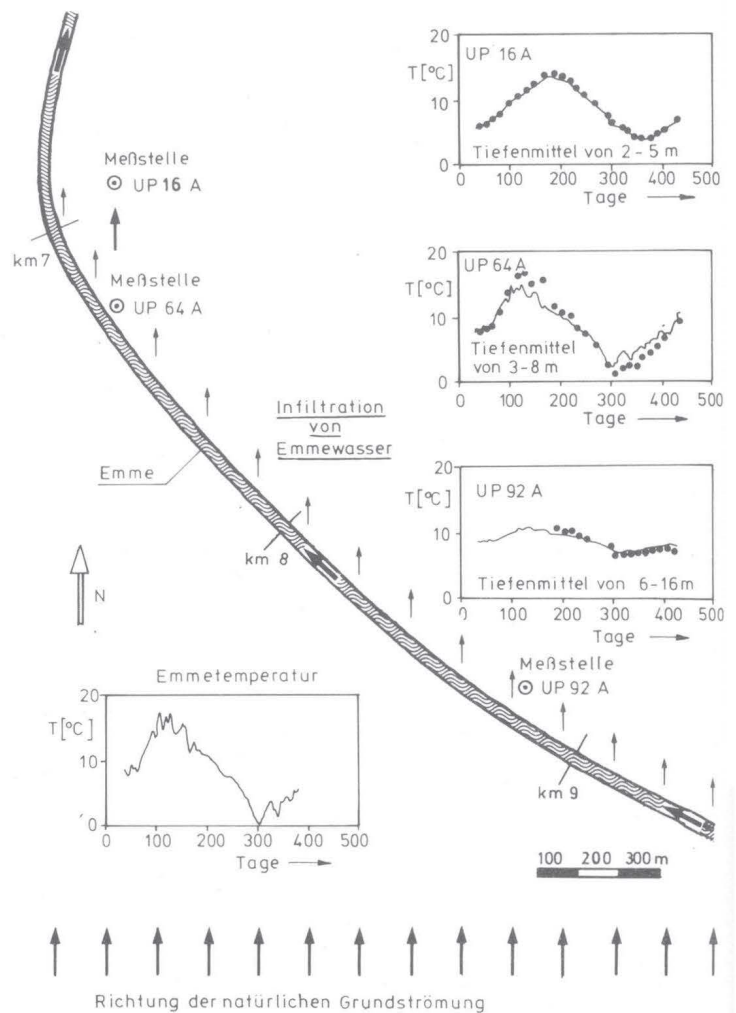


Bild 6: Hydrothermisches Testgebiet Kirchberg: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Grundwassertemperaturen [11]

unter Berücksichtigung anderweitiger Nutzungen (Wasserversorgung) wurden geeignete numerische Modelle entwickelt. Damit steht ein Berechnungsinstrumentarium zur Verfügung, das zur Bearbeitung folgender Fragestellungen eingesetzt werden kann:

- Auslegung von Schluck- und Entnahmebrunnen zur Vermeidung eines thermischen Kurzschlusses für industrielle Kühlwasseranlagen oder für Grundwasser-Wärmepumpen
- Beurteilung der gegenseitigen Beeinflussung mehrerer benachbarter Grundwasser-Wärmenutzer;
- Planung einer gezielten Nutzung anthropogener thermischer Anomalien in Ballungsgebieten
- Beurteilung der Gefährdung von Trinkwasserversorgungsanlagen durch Grundwasser-Wärmenutzer.

Die Modelle wurden anhand von intensiven Naturmessungen des Wasser- und Energiewirtschaftsamts Bern im Emmental (Schweiz) überprüft [9, 11]. Wie die Fallstudien gezeigt haben, erlauben die Modelle eine realistische Ermittlung der Grundwassertemperaturen auch bei komplexen Einleitungsbedingungen und Untergrundverhältnissen mit Schichtenstrukturen [9]. In Bild 6 sind Meßdaten und Rechenergebnisse für das hydrothermische Testgebiet Kirchberg dargestellt. Der Vergleich macht deutlich, daß die Modelle eine hinreichend genaue Berechnung des Untergrund-Wärmehaushalts und die quantitative Erfassung einleitungsbedingter Temperaturveränderungen ermöglichen.

## 7 Landwirtschaft und Grundwasserbeschaffenheit

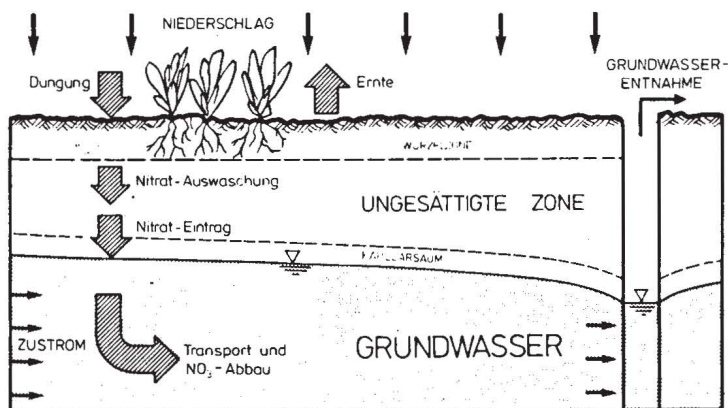
Die moderne Landwirtschaft ist durch einen stark gestiegenen Einsatz von Düngemitteln und Bioziden gekennzeichnet. Dies führt vor allem in den Einzugsgebieten von Grundwassergewinn

nungsanlagen zu Wassergüteproblemen. Eine grundwasserschonende Landwirtschaft ist daher besonders in Wasserschutzgebieten erforderlich [7, 8].

In einem seit 1984 laufenden interdisziplinären Forschungsvorhaben „Nitrat-Fallstudien“ des Landes Baden-Württemberg wird der Zusammenhang zwischen landwirtschaftlicher Nutzung, insbesondere Düngepraxis, und Nitratkonzentration im Grundwasser quantitativ untersucht. Dabei werden in Zusammenarbeit mehrerer Institutionen (Bild 7) Naturmessungen in den Testgebieten Bruchsal-Karlsdorf-Neuhard und Lobdengau durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse und Modellberechnungen zur Nitratbilanzierung sollen den Prozeß und die Ursachen des Nitratreintrags sowie des Nitrat-Abbaus quantitativ erfassen. Aufgrund der insgesamt verfügbaren Daten werden mit Hilfe der Modellrechnungen Wasser- und Nitratbilanzen der Untersuchungsgebiete erstellt. Gleichzeitig wird exemplarisch untersucht, wie in bereichsweise unterschiedlich stark belasteten Einzugsgebieten durch gezielte Bewirtschaftung einzelner Wasserversorgungsbrunnen die Nitratkonzentration im Rohwasser reduziert werden kann. Nähere Ausführungen zu den Untersuchungen vor Ort, zu den begleitenden Laborexperimenten und zu den numerischen Modelluntersuchungen sind in den Fortschrittsberichten der beteiligten Forschungsinstitute enthalten [12].

Die entwickelten Modelle können zur Beantwortung folgender Fragestellungen eingesetzt werden:

- Identifizierung der jeweiligen Einzugsgebiete der einzelnen Brunnen von Trinkwasserversorgungsanlagen und der zugehörigen Aufenthaltszeiten
- Prognose des Nitratreintrags in Abhängigkeit von Bewirtschaftung, Boden und Klima
- Hinweise zum Abbauverhalten von Nitrat im Boden und Grundwasser;
- Prognose der Auswirkung veränderten Nitratreintrags auf die Nitratkonzentration im Wasserwerk (z.B. reduzierter Eintrag durch Änderung der Düngepraxis oder erhöhter Eintrag durch Grünlandumbruch);
- Planungshilfe für Meßstrategien zur Beobachtung der Langzeitentwicklung und der Auswirkungen von Maßnahmen,
- Planungshilfe für die Konzeption hydraulischer Sanierungsmaßnahmen bei deutlichen Unterschieden im Nitratgehalt des Grundwassers (Brunnenanordnung, erforderliche Pump-rate, Wirkungsgrad);
- Planungshilfe für in-situ Sanierungstechniken.



Beteiligte Institutionen:

Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) Augustenbergl

Institut für Bodenkunde und Standortslehre Universität Hohenheim

Engler-Bunte-Institut Universität Karlsruhe

Institut für Wasserbau Universität Stuttgart

Bild 7: Stickstoffumsetzungen im Boden und Grundwasser: Prinzipbild zu den Nitrat-Fallstudien und beteiligte Institutionen

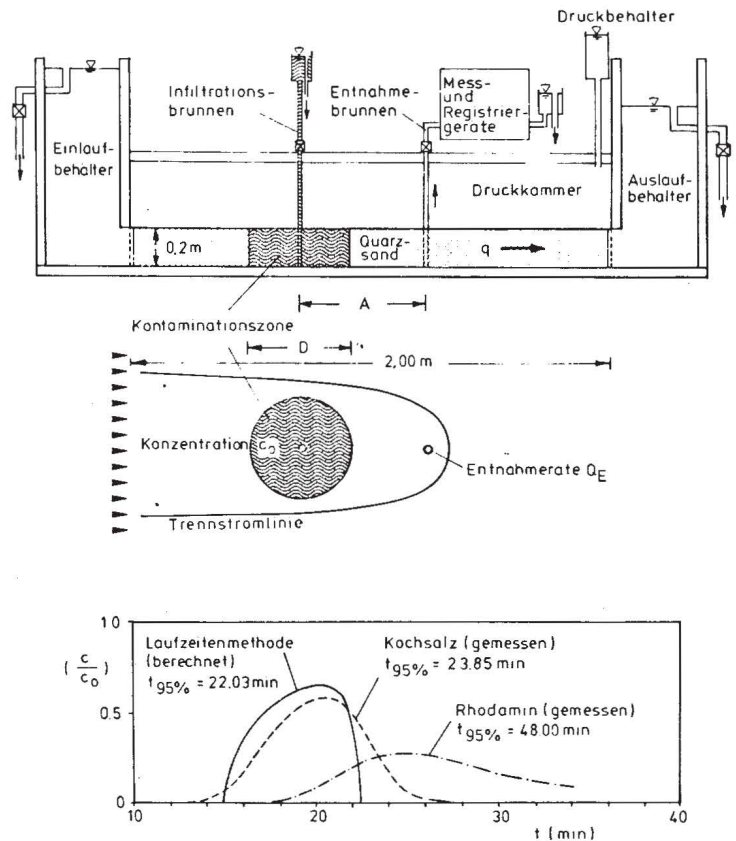


Bild 8: Grundlagenexperimente zum Wirkungsgrad hydraulischer Sanierungsmaßnahmen [3, 4]

Ergänzt werden die Nitrat-Fallstudien durch die Einrichtung des Naturmeßfeldes auf der Horkheimer Insel, in dem Untersuchungen zur Beeinflussung des Grundwassers durch die Landwirtschaft, insbesondere durch Agrarchemikalien, und über die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitungs- und Anbaumethoden durchgeführt werden. Alle diese Forschungsarbeiten haben zum Ziel, einen fachlichen Beitrag für die notwendige Definition einer ordnungsgemäßen bzw. einer grundwasserschonenden Landwirtschaft zu liefern und konkrete Hinweise für die erforderlichen Nutzungsbeschränkungen in Wassereinzugs- und Schutzgebieten zu geben.

## 8 Untergrundkontamination und Sanierung

Industrielle Grundwasserverunreinigungen vor allem durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) haben zu großräumigen Grundwasserbelastungen geführt. Im Rahmen eines interdisziplinären Arbeitskreises des MELUF Baden-Württemberg wurde schon vor Jahren eine Reihe von Untersuchungen über das Verhalten leichtflüchtiger CKW im Untergrund durchgeführt. Dabei konnten unter Einsatz numerischer Strömungs- und Transportmodelle Erfahrungen und Erkenntnisse gesammelt werden, die ihren Niederschlag in einem gemeinsam mit zahlreichen Landesbehörden und Forschungseinrichtungen erarbeiteten Leitfaden des MELUF Baden-Württemberg fanden [2].

In diesem Zusammenhang wurden systematische Laborexperimente zu den Grundlagen der hydraulischen Sanierung von Grundwasserleitern durchgeführt [4]. In Bild 8 ist der Versuchsaufbau sowie ein Ergebnis gezeigt, das beispielhaft die Bedeutung von Konvektion, Dispersion und Adsorption für den Verlauf und den Wirkungsgrad einer hydraulischen Sanierungsmaßnahme illustriert.

Gleichzeitig wurden numerische Transportmodelle entwickelt [3, 5], die zur Beantwortung folgender Fragen geeignet sind:

- Beurteilung der Gefährdung von Trinkwasserversorgungs-

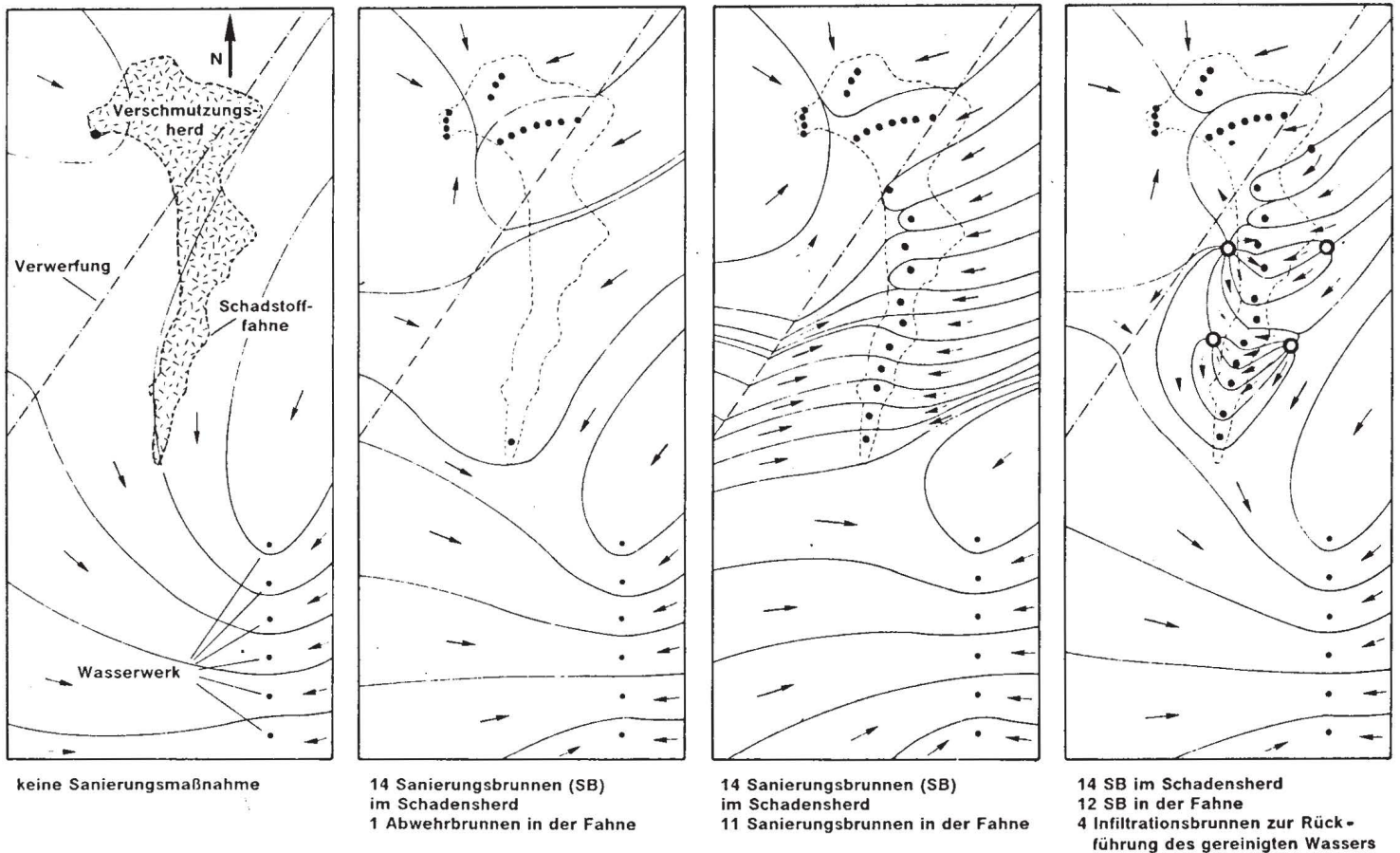


Bild 9: Unterschiedliche Strategien zur hydraulischen Sanierung einer Grundwasserkontamination [4, 5]

- anlagen durch bekanntgewordene CKW-Kontaminationen;
- Planungshilfe für Meßstrategien zur Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Kontaminationszone (bei unbekannter Quelle auch Rückschlüsse auf Ort und Zeit des Eintrags);
  - Planungshilfe für die Konzeption hydraulischer Abwehr- und Sanierungsmaßnahmen;
  - Abschätzung des Wirkungsgrades und der Dauer von Sanierungsmaßnahmen und Entwicklung optimaler Sanierungsstrategien.

Praktische Erfahrungen über die Möglichkeiten der Erkundung, Abwehr und Sanierung von Grundwasserunreinigungen durch CKW sowie andere Stoffe konnten in den zurückliegenden Jahren anhand mehrerer angewandter Problemfälle gesammelt werden. Hinzu kommen neuere Untersuchungen zu Sanierungsverfahren durch Absaugen von Bodenluft. Ein Beispiel für die Planung einer hydraulischen Sanierungsmaßnahme für eine CKW-Kontamination ist in Bild 9 dargestellt. Für verschiedene Sanierungsstrategien können Sanierungsverlauf, Sanierungsdauer und Wirkungsgrad jeweils abgeschätzt werden, wobei sich drastische Unterschiede ergeben [3, 4, 5]. Mit Hilfe der Modellrechnungen kann die Sanierungsmaßnahme optimiert werden.

Eine besondere Herausforderung stellt die Problematik der Altlastensanierung dar. Hier gilt es, geeignete in-situ Sanierungsverfahren zu entwickeln und zu testen. Zur systematischen Methodenentwicklung ist deshalb geplant, Kontaminations- und Sanierungsexperimente in dafür geeigneten Großversuchständen durchzuführen.

## 9 Anwendungen in Grundwasserbewirtschaftung und Wasserversorgung

Die sachgerechte Planung von Wasserversorgungsanlagen und deren optimaler Betrieb bei steigenden Grundwasserbelastungen setzt die Kenntnis der Grundwasserströmungsverhältnisse

voraus. Die Einzugsgebiete und die erforderlichen Schutzzonen für Wassergewinnungsanlagen sowie die Auswirkungen von Entnahmen auf Grundwasserstände und Oberflächengewässer können mit Hilfe eines geeigneten Instrumentariums verschiedener Strömungs- und Transportmodelle ermittelt werden. Die Modelle liefern Aussagen zur Beurteilung des Ist-Zustandes, zur Optimierung von Bewirtschaftungsmaßnahmen und zur Prognostizierung der Auswirkungen geplanter Maßnahmen. Sie werden eingesetzt, um im Auftrag von Wasserversorgungsunternehmen praktische Grundwasserbewirtschaftungsprobleme zu analysieren.

Als Beispiel für die Untersuchung der Auswirkung von Grundwasserentnahmen und der Nutzungswürdigkeit des Aquifers auch unter ökologischen Aspekten seien die im Auftrag des Zweckverbandes Landeswasserversorgung Stuttgart durchgeführte Studie „Erolzheimer Feld“ sowie die Modell- und Optimierungsberechnungen für den alluvialen Aquifer des Loischaltals genannt. Ähnliche Fragestellungen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Aspekte der Wassergüte (Uferfiltration) sind Gegenstand von Untersuchungen im Auftrag der Stadtwerke Karlsruhe.

Eine weitere Aufgabe von zunehmender Bedeutung ergibt sich aus der Tatsache, daß zahlreiche Wasserwerke sich mit der Gefährdung der Grundwasserqualität in ihrem Vorfeld konfrontiert sehen. Diese hat meistens in landwirtschaftlichen oder industriellen Aktivitäten ihre Ursache. In diesen Fällen ist eine Abschätzung des Gefährdungspotentials und die Entwicklung geeigneter Bewirtschaftungskonzepte erforderlich. Auch hierfür sind numerische Strömungs- und Transportmodelle unerlässlich, wie beispielsweise Untersuchungen im Falle des Wasserwerks Rheinau der Stadtwerke Mannheim oder im Fall der Wasserwerke Bruchsal und Karlsdorf-Neuthard zeigen. Mit ihrer Hilfe kann die Wasserqualität der individuellen Einzugsgebiete im Vorfeld einzelnen Förderbrunnen zugewiesen werden. Durch eine geeignete Kombination von Förderraten kann somit die Rohwasserqualität optimiert werden.

## 10 Schlußbemerkung

Das hier beschriebene Forschungsprogramm wurde durch Förderung und finanzielle Zuwendungen verschiedener Organisationen ermöglicht.

Angewandte Untersuchungen wurden im Auftrag namhafter Wasserversorgungsunternehmen, der Wasserwirtschaftsverwaltung, sowie von Kommunen, Industriebetrieben und Ingenieurbüros durchgeführt. Von den Institutionen zur Forschungsförderung sind insbesondere zu nennen:

- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): Forschergruppe „Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser“;
- Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten (MELUF) Baden-Württemberg: Untersuchungen zum CKW-Leitfaden und Nitrat-Fallstudien,
- Projekt Wasser, Abfall, Boden (PWAB) Baden-Württemberg: Testfeld Wasser und Boden auf der Horkheimer Insel;
- Kommission der europäischen Gemeinschaften, Forschungsprogramm Umwelt;
- Ministerium für Wissenschaft und Kunst Baden-Württemberg: Forschungszusatzmittel zum Forschungsschwerpunkt Grundwasserschutz.

Allen Förderern und Auftraggebern sei an dieser Stelle für ihre Unterstützung gedankt.

### Schrifttum

- [1] Kobus, H.: Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser, Tätigkeitsbericht 1986/87, DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart, Mitteilungsheft Nr. 66, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1987
- [2] MELUF Baden-Württemberg, Herausgeber: Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe, Wasserwirtschaftsverwaltung Heft 13, 1983

- [3] Herr, M., J. Herzer, W. Kinzelbach, H. Kobus, B. Rinnert: Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen, Mitteilungsheft 54, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1983
- [4] Herr, M.: Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter, Mitteilungsheft 63, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1986
- [5] Kinzelbach, W.: Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser, Oldenbourg Verlag, München, 1987
- [6] Kobus, H., T. Söll: Der Wärmehaushalt des Grundwassers und seine Nutzung, Wasserkalender 1987, Erich Schmidt Verlag, Berlin, Bielefeld, München, 1987
- [7] Kobus, H.: Nitrat und Biozide im Grundwasser und Konsequenzen für die Trinkwassergewinnung, in: Umwelt, Wirtschaft, Gesellschaft – Wege zu einem neuen Grundverständnis, Maisch-Queck-Verlag, 1986
- [8] Rohmann, U., H. Sontheimer: Nitrat im Grundwasser. Ursachen, Bedeutung, Lösungswege. DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH), 1985
- [9] Söll, T.: Vertikal-ebene Modellierung einer Kaltwasserversickerung in das Grundwasser, Wasserwirtschaft, Heft 9, 1985
- [10] Spitz, K.: Dispersion in porösen Medien – Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden, Mitteilungsheft 60, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1985
- [11] Söll, T., H. Kobus, M. Berg: Numerische Modellierung der Emme-Versickerung im Testareal Kirchberg, Wissenschaftlicher Bericht HWV 074, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1987
- [12] Forschungsvorhaben „Nitrat im Grundwasser – Fallstudien“ des MELUF Baden-Württemberg, Zwischenberichte der Forschungsinstitute, 1987 (unveröffentlicht):
  - a) Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim (van der Ploeg, R.R., H. Götz-Huwe, W. Simon)
  - b) DVGW-Forschungsstelle am EBI, Universität Karlsruhe (Sontheimer, H., U. Rohmann, M. Rödelberger)
  - c) Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart (Franz, T., V. Kaleris, C. Kauffmann, W. Kinzelbach, H. Kobus)

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. H. Kobus, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 7000 Stuttgart 80